https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-3(23)-34

BY 4.0
Check for updates

МРНТИ: 55.39.29

Е.Т. Абильмажинов, Е.Я. Шаяхметов, Д.К. Дукенбаев*, Р.А. Советбаев, В.Н. Коц
[1]Шәкәрім университет,
071412, Республика Казахстан, г. Семей, ул. Глинки, 20 А
*e-mail: Da_mir.1991@mail.ru

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАГРУЗОЧНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК И ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПНЕВМОДВИГАТЕЛЯ В СОСТАВЕ УСТАНОВКИ НАКОПЛЕНИЯ ЭНЕРГИИ СЖАТОГО ВОЗДУХА

Аннотация: *В работе представлены результаты исследования нагрузочных характеристик реактивного пневмодвигателя струйного типа, работающего на энергии сжатого воздуха. Рассмотрены конструктивные особенности двухсекционного двигателя, в котором преобразование энергии осуществляется за счет реактивной силы струи и давления расширяющегося воздуха на лопасти ротора. Описан принцип работы устройства, включающий процессы подачи, распределения, расширения и выпуска рабочей среды. Для оценки эксплуатационных характеристик выполнено математическое моделирование в среде MATLAB/Simulink. Проведен анализ влияния входного давления на основные параметры работы двигателя: мощность, частоту вращения, угловую скорость и крутящий момент. Установлено, что увеличение давления приводит к устойчивому росту всех исследуемых показателей. Наиболее выраженная зависимость наблюдается для мощности и частоты вращения, что подтверждает возможность регулирования режимов работы путем изменения давления подаваемого воздуха. Рост крутящего момента обусловлен увеличением реактивной силы струи и воздействием расширяющейся среды на лопасти. Полученные результаты позволяют оценить работоспособность конструкции и характер изменения ее характеристик в широком диапазоне давлений. Они могут быть использованы при проектировании пневмодвигателей и выборе рациональных режимов их эксплуатации, а также служат основой для последующих экспериментальных исследований.*

Ключевые слова: *реактивный пневмодвигатель, сжатый воздух, энергоаккумулирование, входное давление, частота вращения, угловая скорость, крутящий момент, мощность.*

Введение

Реактивные (струйные) пневмодвигатели, работающие на сжатом воздухе, представляют собой класс устройств, в которых момент вращения рождается за счёт реактивной силы струи воздуха, истекающей из сопел, которые находятся на лопасти или вращающемся роторе. Принцип работы основан на законе сохранения импульса – при истечении воздуха из сопла возникает сила отдачи, направленная в сторону, противоположную вектору скорости истечения, что и приводит к вращению рабочего органа [1, 2]. Данный тип пневмодвигателей отличается простотой конструкции, отсутствием сложных трущихся пар, высокой работоспособностью и возможностью работы в условиях повышенной влажности и загрязненности рабочей среды [3, 4].

В отличие от поршневых и пластинчатых пневмомоторов, реактивные двигатели на сжатом воздухе не требуют сложной системы смазки, имеют минимальный износ и могут развивать высокочастотные вращения при сравнительно небольшом рабочем давлении [5, 6]. В качестве основного недостатка таких двигателей стоит отметить все-таки относительно невысокий коэффициент полезного действия, который связан с потерями кинетической энергии выходящего воздуха. Однако в системах накопления энергии сжатого воздуха, где важными требованиями являются простота конструкции, надежность, скорость запуска и возможность работы от ресивера, реактивные пневмодвигатели могут рассматриваться как довольно перспективное техническое решение [7].

В инженерной практике активно используются разные виды пневматических двигателей: среди них можно выделить пластинчатые, поршневые, шестерёнчатые,

©Е.Т. Абильмажинов, Е.Я. Шаяхметов, Д.К. Дукенбаев, Р.А. Советбаев, В.Н. Коц, 2026

турбинные и струйные модели. Наиболее популярными стали пластинчатые и редукторные пневмодвигатели. Эти устройства находят широкое применение в ручных пневматических инструментах, промышленных приводах, шлифовальных машинах, гайковёртах, конвейерных системах и специализированных технологических установках. В качестве примеров серийных решений можно привести пневмодвигатели DEPRAG серий BASIC LINE, ADVANCED LINE и POWER LINE, пневмодвигатели и мотор-редукторы Gast Air Motors/Gearmotors, а также промышленные пневмодвигатели Atlas Copco серий LZB и LZL [8-10]. Целью работы является определение нагрузочных характеристик пневмодвигателя и оценка возможности его применения при различных значениях входного давления.

Материалы и методы

Объектом настоящего изыскания является реактивный пневмодвигатель, конструкция которого изображена на рисунке 1 [11]. Двигатель состоит из двухсекционного корпуса, каждая секция которого состоит из рабочей и разделительной камер. В рабочей камере установлен ротор с лопастями и сквозными каналами, жестко закрепленный на центральном полом валу. Внутри полого вала имеется неподвижная впускная труба, имеющая окна, предназначенные для подачи рабочего тела в рабочие камеры. Конструктивная схема пневмодвигателя показана на рисунке 1.

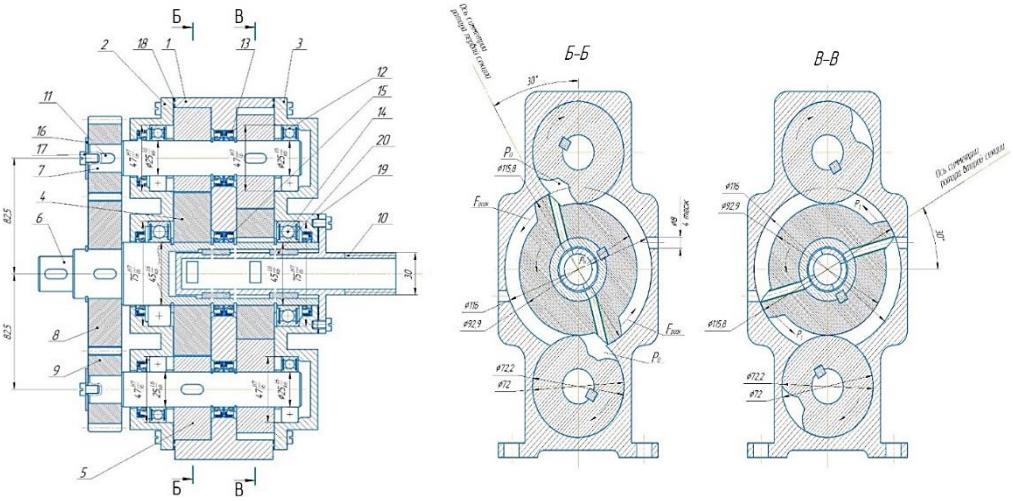


Рисунок 1 – Конструктивная схема многосекционного пневмодвигателя

Центральный полый вал вращается внутри впускной трубы. За счёт этого сжатый газ подаётся и распределяется между секциями двигателя. Рабочее тело сначала попадает в окна впускной трубы, затем проходит через сквозные отверстия полого вала и каналы ротора. Так он добирается до лопастей, где газ расширяется и создаётся вращающий момент.

Чтобы секции работали синхронно, ротор соединён зубчатой передачей с колесом-разделителем на параллельном валу. Вместе ротор и колесо-разделитель образуют рабочие камеры, объём которых меняется. Это позволяет последовательно разделять потоки рабочего тела и эффективно превращать энергию сжатого газа в механическую энергию вращения.

Когда газ совершил работу, он выходит через выпускные окна в корпусе двигателя. Секции отделены друг от друга торцевыми перегородками, но объединены общей системой подачи рабочего тела. Такая конструкция даёт каждой секции работать независимо, не нарушая целостности всего механизма.

Пневмодвигатель устроен довольно просто. Сжатая рабочая среда – это может быть пар, газ или жидкость – подаётся под давлением $P_{\text{н}}$ через прорези впускной трубы. Оттуда она попадает в ту часть корпуса, где в данный момент прорези трубы совпадают со сквозными каналами ротора.

В данном случае это будет первая секция корпуса. Проходя через сквозные каналы ротора, рабочая среда выбрасывается в полость рабочей камеры корпуса, при этом давление рабочей среды в рабочей камере падает с $P_{\text{н}}$ до P_o, а на лопасти начинает действовать

реактивная сила $F_{\text{реак}}$, создавая вращательный момент на центральном валу, на котором установлен ротор.

$$F_{\text{реак}} = M(V - V_0), \quad (1)$$

где M – секундный расход рабочей среды, кг/с;

V – скорость рабочей среды на выходе из сквозного канала ротора, м/с;

V_0 – скорость движения лопасти ротора в зоне расположения сквозного канала, м/с.

В это время во второй секции корпуса при закрытых сквозных каналах ротора, рабочая среда начинает расширяться, начиная прикладывать к лопасти давление P_1 (которое поменяется в процессе расширения на P_2, затем от P_2 на P_3), со второй секции корпуса.

$$P_1 = P \cdot S, \quad (2)$$

где P – давление рабочей среды во второй секции корпуса при расширении, Па;

S – площадь боковой поверхности лопасти, на которую действует давление рабочей среды, м^2.

При этом на лопасти действует сила давления $F_{\text{р}}$, изменяющаяся по мере расширения рабочей среды и также создающая крутящий момент по направлению вращения ротора. В результате происходит непрерывное вращение за счет чередования процессов подачи, расширения и выпуска рабочей среды в двух секциях корпуса, а отбор мощности с центрального полого вала производится через хвостовик.

$$M_{\text{кр}} = \left(F_{\text{реак}} + P_1\right) \cdot 2R + M_0, \quad (3)$$

где $F_{\text{реак}}$– реактивная сила, возникающая при истечении рабочей среды из сквозных каналов ротора;

P_1 – сила давления рабочей среды, действующая на лопасть во второй секции корпуса при расширении;

R – радиус, определяющий плечо действия сил относительно оси вращения;

M_0 – дополнительный реактивный момент, возникающий при выбросе остатков рабочей среды из сквозных каналов ротора.

$$2R + M_0 = F_0 \cdot 2R, \quad (4)$$

где F_0 – реактивная сила, возникающая при выбросе остаточной рабочей среды из сквозных каналов ротора.

Результаты и обсуждение

Для определения нагрузочных характеристик реактивного пневмодвигателя струйного типа была проведена компьютерная симуляция в среде MATLAB/Simulink. В модели была задана подача сжатого воздуха через входной канал двигателя с изменением входного давления в установленном диапазоне. В процессе моделирования фиксировались основные рабочие параметры: частота вращения вала, угловая скорость, крутящий момент и мощность. Полученные расчётные значения были использованы для построения графических зависимостей рабочих характеристик пневмодвигателя от входного давления.

В качестве исходных параметров моделирования были заданы следующие значения:

- Рабочее избыточное давление: P = 6 бар.
- Абсолютное давление до отверстий: P_0 = 7·10⁵ Па.
- Показатель адиабаты воздуха: k = 1,4.
- Газовая постоянная: R = 287 Дж/(кг·К).
- Диаметр отверстия: d = 6 мм.
- Коэффициент расхода: C_d= 0,75.

Данные, полученные в результате симуляции показаны на рисунке 2.

Применяемый метод анализа графико-численных отношений и проведенный по его результатам анализ привел к тому, что стало ясно – увеличенное входящее давление сжатого воздуха сказывается на все главные эксплуатационные параметры реактивного пневмодвигателя. Робота пневмодвигателя на выходе в вал поступает мощность, которая с увеличением входного давления увеличивается фактически в линейной зависимости.

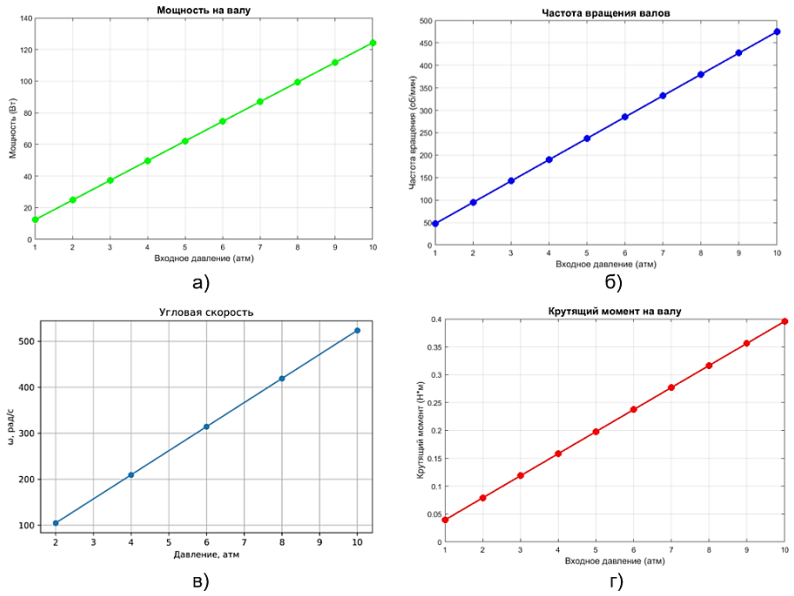


Рисунок 2 – Зависимость основных эксплуатационных характеристик реактивного пневмодвигателя от давления:
а – мощность; б – частота вращения лопасти; в – угловая скорость лопасти; г – крутящий момент

Объясняется это увеличением энергии потока рабочей среды, который уходит через сквозные каналы ротора. Иными словами, выросло давление подачи – выросла полезная мощность, развиваемая пневмодвигателем. Увеличивается и частота вращения вала при увеличении входного давления. Значит, характерная связь – взаимозависимость между скоростным режимом работы пневмодвигателя и давлением сжатого воздуха на входе, что вполне естественно. Увеличивается угловая скорость вращения ротора при увеличении давления рабочей среды. Это значит, что возросло давление, значит выросло истечение рабочей среды, возросла соответственно скорость вращения ротора. Увеличивается крутящий момент на валу пневмодвигателя при увеличении входящего давления. Увеличение крутящего момента происходит от увеличения реактивной силы струи и от увеличения воздействия рабочей среды на лопасти ротора.Наблюдается упорная зависимость всех рассматриваемых параметров от входящего давления. Мощность, частота вращения, угловая скорость, крутящий момент – все они при большом входящем давлении вырастают. Полученные в MATLAB/Simulink результаты имеют расчётно-модельный характер и позволяют предварительно оценить влияние входного давления на рабочие характеристики пневмодвигателя. Для уточнения полученных зависимостей в дальнейшем планируется изготовление опытного образца пневмодвигателя в металле и проведение экспериментальных испытаний. Это позволит получить более точные данные о мощности, частоте вращения, угловой скорости и крутящем моменте при различных режимах подачи сжатого воздуха, а также сравнить результаты компьютерного моделирования с реальными эксплуатационными показателями.

Заключение

В результате проведенного компьютерного моделирования и его реализации в среде MATLAB/Simulink были построены графические зависимости ключевых рабочих характеристик реактивного пневмодвигателя от давления входящего сжатого воздуха. Проведенный анализ кривых показал, что с ростом давления наблюдается устойчивое увеличение мощности, частоты вращения, угловой скорости и крутящего момента.

Возрастающая почти линейно мощность на валу объясняется увеличением избыточной энергии истечения сжатого воздуха через сопловые отверстия. Аналогично, частота вращения растет с увеличением давления, что позволяет осуществлять регулирование работы пневмодвигателя путем изменения дозированного давления. Угловая скорость в диапазоне давления от 2 до 10 атм возрастает с 104,6 до 523,3 рад/с, крутящий момент на валу также демонстрирует положительную связь с входным давлением.

Таким образом, результаты моделирования подтверждают то, что входное давление является определяющим параметром, который влияет на нагрузочные и скоростные характеристики пневмодвигателя, и то, что полученные зависимости подтверждают работоспособность предложенной конструкции и возможность его применении в системе накопления энергии сжатого воздуха.

Список литературы

1. Пневматический привод горных машин / А.В. Иванов и др. – Москва: ЦИНТИАМ, 1963. – 58 с.
2. Beater P. Pneumatic drives: system design, modelling and control / P. Beater. – Berlin: Springer-Verlag, 2007. – 323 p.
3. Majumdar S.R. Pneumatic systems: principles and maintenance / S.R. Majumdar. – New Delhi: Tata McGraw-Hill, 1996. – 282 p.
4. Control performance of an air motor: can air motors replace electric motors? / S.R. Pandian et al // Proceedings of the 1999 IEEE International Conference on Robotics and Automation. – 1999. – Vol. 1. – P. 518-524. https://doi.org/10.1109/ROBOT.1999.770029.
5. Калиев А.К. Анализ рабочих процессов пластинчатого пневмомотора с учётом утечек рабочего тела / А.К. Калиев, Р.Т. Смагулов // Вестник машиностроения. – 2021. – № 5. – С. 34-39.
6. Modeling and analysis of a novel rotary pneumatic motor with symmetric multi-cylinder / Y. Xing et al // Chinese Journal of Mechanical Engineering. – 2019. – Vol. 32, № 1. – Art. 15.
7. Beater P. Modelling and control of pneumatic vane motors / P. Beater // International Journal of Fluid Power. – 2004. – Vol. 5, № 1. – P. 7-16.
8. DEPRAG SCHULZ GMBH & CO. KG. Air motors: product catalog [Electronic resource]. – Amberg : DEPRAG, 2024.
9. Gast Manufacturing, Inc. Air motors/gearmotors: product catalog [Electronic resource]. – Benton Harbor : Gast Manufacturing, 2018.
10. Atlas Copco. Air motors LZB/LZL: product catalogue [Electronic resource]. – Stockholm : Atlas Copco Industrial Technique, 2024.
11. Патент № 32403 Республика Казахстан, МПК не указан. Роторная машина / С.М. Анибаев, А.Ж. Акимжанов; заявитель и патентообладатель не указаны. – Заявл. 10.03.2016 ; опубл. 29.09.2017.

References

1. Pnevmaticheskii privod gornykh mashin / A.V. Ivanov i dr. – Moskva: TSINTIAM, 1963. – 58 s. (in Russian).
2. Beater P. Pneumatic drives: system design, modelling and control / P. Beater. – Berlin: Springer-Verlag, 2007. – 323 p. (in English).
3. Majumdar S.R. Pneumatic systems: principles and maintenance / S.R. Majumdar. – New Delhi: Tata McGraw-Hill, 1996. – 282 p. (in English).
4. Control performance of an air motor: can air motors replace electric motors? / S.R. Pandian et al // Proceedings of the 1999 IEEE International Conference on Robotics and Automation. – 1999. – Vol. 1. – P. 518-524. https://doi.org/10.1109/ROBOT.1999.770029. (in English).
5. Kaliev A.K. Analiz rabochikh protsessov plastinchatogo pnevmomotora s uchetom utechek rabochego tela / A.K. Kaliev, R.T. Smagulov // Vestnik mashinostroeniya. – 2021. – № 5. – S. 34-39. (in Russian).
6. Modeling and analysis of a novel rotary pneumatic motor with symmetric multi-cylinder / Y. Xing et al // Chinese Journal of Mechanical Engineering. – 2019. – Vol. 32, № 1. – Art. 15. (in English).
7. Beater P. Modelling and control of pneumatic vane motors / P. Beater // International Journal of Fluid Power. – 2004. – Vol. 5, № 1. – P. 7-16. (in English).
8. DEPRAG SCHULZ GMBH & CO. KG. Air motors: product catalog [Electronic resource]. – Amberg : DEPRAG, 2024. (in English).
9. Gast Manufacturing, Inc. Air motors/gearmotors: product catalog [Electronic resource]. – Benton Harbor : Gast Manufacturing, 2018. (in English).
10. Atlas Copco. Air motors LZB/LZL: product catalogue [Electronic resource]. – Stockholm : Atlas Copco Industrial Technique, 2024. (in English).

11. Patent № 32403 Respublika Kazakhstan, MPK ne ukazan. Rotornaya mashina / S.M. Anibaev, A.Zh. Akimzhanov; zayavitel' i patentoobladatel' ne ukazany. – Zayavl. 10.03.2016 ; opubl. 29.09.2017. (in Russian).

Финансирование

Данное исследование выполнено в рамках проекта AP26197931 «Разработка и исследование ветро-солнечной установки с автоматизированным управлением для бесперебойного электро- и водоснабжения сельскохозяйственных объектов» Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан.

E.T. Abilmazhinov, E.Ya. Shayakhmetov, D.K. Dukenbaev*, R.A. Sovetbayev, V.N. Kots
Shakarim University,
20A Glinki St., Semey 071412, Republic of Kazakhstan
*e-mail: Da_mir.1991@mail.ru

DETERMINATION OF LOAD CHARACTERISTICS AND DESIGN OF A PNEUMATIC MOTOR AS PART OF A COMPRESSED AIR ENERGY STORAGE SYSTEM

This paper presents the results of a study on the load characteristics of a jet-type reaction pneumatic motor powered by compressed air. The design features of a two-stage motor are considered, in which energy conversion is achieved through the reaction force of the air jet and the pressure exerted by the expanding compressed air on the rotor blades. The operating principle of the device is described, including the processes of air supply, distribution, expansion, and exhaust of the working medium. To evaluate the operational characteristics, mathematical modeling was carried out in the MATLAB/Simulink environment. The influence of inlet pressure on the main performance parameters of the pneumatic motor, including output power, rotational speed, angular velocity, and torque, was analyzed. The results show that increasing the inlet pressure leads to a steady increase in all investigated parameters. The most pronounced dependence was observed for output power and rotational speed, confirming the possibility of controlling the operating modes by varying the supply air pressure. The increase in torque is attributed to the higher reaction force generated by the air jet and the enhanced effect of the expanding air on the rotor blades. The obtained results make it possible to evaluate the operability of the proposed design and the variation of its performance over a wide pressure range. These findings can be applied to the design of pneumatic motors, the selection of optimal operating conditions, and serve as a basis for further experimental investigations.

Key words: *reaction pneumatic motor, compressed air, compressed air energy storage, inlet pressure, rotational speed, angular velocity, torque, power.*

Е.Т. Абильмажинов, Е.Я. Шаяхметов, Д.Қ. Дүкенбаев*, Р.А. Советбаев, В.Н. Коц
Шәкәрім университеті,
071412, Қазақстан Республикасы, Семей қ., Глинки көш., 20А
*e-mail: Da_mir.1991@mail.ru

СЫҒЫЛҒАН АУА ЭНЕРГИЯСЫН ЖИНАҚТАУ ҚОНДЫРҒЫСЫ ҚҰРАМЫНДАҒЫ ПНЕВМАТИКАЛЫҚ ҚОЗҒАЛТҚЫШТЫҢ ЖҮКТЕМЕЛІК СИПАТТАМАЛАРЫН АНЫҚТАУ ЖӘНЕ ЖОБАЛАУ

Жұмыста сығылған ауа энергиясымен жұмыс істейтін ағынды типтегі реактивті пневматикалық қозғалтқыштың жүктемелік сипаттамаларын зерттеу нәтижелері ұсынылған. Энергияны түрлендіру ағынның реактивті күші мен кеңейетін ауаның ротор қалақшаларына түсіретін қысымы есебінен жүзеге асатын екі секциялы қозғалтқыштың конструкциялық ерекшеліктері қарастырылды. Құрылғының жұмыс істеу қағидаты, оның ішінде жұмыс ортасын беру, тарату, кеңейту және шығару процестері сипатталған. Пайдалану сипаттамаларын бағалау мақсатында MATLAB/Simulink ортасында математикалық модельдеу жүргізілді. Қозғалтқыштың негізгі жұмыс параметрлеріне, атап айтқанда қуатына, айналу жиілігіне, бұрыштық жылдамдығына және айналу моментіне кіріс қысымының әсері талданды. Зерттеу нәтижелері кіріс қысымының артуы қарастырылған барлық көрсеткіштердің тұрақты өсуіне алып келетінін көрсетті. Ең айқын тәуелділік қуат пен айналу жиілігі үшін байқалды, бұл берілетін ауаның қысымын өзгерту арқылы қозғалтқыштың жұмыс режимдерін реттеуге болатындығын дәлелдейді. Айналу моментінің артуы ағынның реактивті күшінің ұлғаюымен және кеңейетін ауаның ротор қалақшаларына әсерінің күшеюімен түсіндіріледі. Алынған нәтижелер қозғалтқыш конструкциясының жұмысқа қабілеттілігін және оның сипаттамаларының қысымның кең диапазонында өзгеру заңдылықтарын бағалауға мүмкіндік береді. Зерттеу нәтижелері пневматикалық қозғалтқыштарды жобалау

кезінде, олардың тиімді жұмыс режимдерін таңдауда, сондай-ақ кейінгі эксперименттік зерттеулерге негіз ретінде пайдаланылуы мүмкін.

Түйін сөздер: *реактивті пневматикалық қозғалтқыш, сығылған ауа, энергияны жинақтау, кіріс қысымы, айналу жиілігі, бұрыштық жылдамдық, айналу моменті, қуат.*

Авторлар туралы мәліметтер

Ермек Толегенович Абильмажинов – техника ғылымдарының докторы, Шәкәрім университетінің «Автоматтандыру және ақпараттық технологиялар» кафедрасының профессоры, Қазақстан Республикасы; e-mail: eras71@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7344-097.

Ержан Ярнарович Шаяхметов – PhD, «Автоматтандыру және ақпараттық технологиялар», Шәкәрім университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: shaiakhmeterzh@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7986-0083.

Дамир Кайратович Дукенбаев* – «Биоинженерлік жүйелер» кафедрасының докторанты; Шәкәрім университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: Da_mir.1991@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0005-4197-9133.

Раил Аянович Советбаев – PhD, «Автоматтандыру және ақпараттық технологиялар», Шәкәрім университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: rsovetbayev@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0007-3605-515X.

Владислав Николаевич Коц – «Машина жасау» мамандығы бойынша техника ғылымдарының магистрі, Шәкәрім университеті, Қазақстан Республикасы, Инжиниринг орталығының ғылыми қызметкері; e-mail: kotsvladislav1@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0001-5312-9719.

Сведения об авторах

Ермек Толегенович Абильмажинов – доктор технических наук, профессор кафедры «Автоматизация и информационные технологии», Шәкәрім университет, Республика Казахстан; e-mail: eras71@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7344-097.

Ержан Ярнарович Шаяхметов – PhD, старший преподаватель кафедры «Автоматизация и информационные технологии», Шәкәрім университет, Республика Казахстан; e-mail: shaiakhmeterzh@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7986-0083.

Дамир Кайратович Дукенбаев* – докторант кафедры «Биоинженерных систем», Шәкәрім университет, Республика Казахстан; e-mail: Da_mir.1991@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0005-4197-9133.

Раил Аянович Советбаев – PhD, заведующий кафедры «Автоматизация и информационные технологии», Шәкәрім университет, Республики Казахстан; e-mail: rsovetbayev@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0007-3605-515X.

Владислав Николаевич Коц – магистр технических наук по специальности «Машиностроение», Шәкәрім университет, Республика Казахстан, научный сотрудник Инжинирингового центра; e-mail: kotsvladislav1@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0001-5312-9719.

Information about the authors

Yermek Tolegenovich Abilmazhinov – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Automation and Information Technologies, Shakarim University, Republic of Kazakhstan; e-mail: eras71@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7344-097.

Yerzhan Shayakhmetov – PhD, «Automation and Information Technologies», Shakarim University, Republic of Kazakhstan; e-mail: shaiakhmeterzh@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7986-0083.

Damir Kairatovich Dukenbaev* – doctoral student of the Department of Bioengineering Systems; Shakarim University, Republic of Kazakhstan; e-mail: Da_mir.1991@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0005-4197-9133.

Rail Ayanovich Sovetbayev – PhD, «Automation and Information Technologies», Shakarim University, Republic of Kazakhstan; e-mail: rsovetbayev@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0007-3605-515X.

Vladislav Nikolaevich Kots – Master of Technical Sciences in Mechanical Engineering, Shakarim University, Republic of Kazakhstan; Researcher at the Engineering Center; e-mail: kotsvladislav1@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0001-5312-9719.

Поступила в редакцию 17.07.2026
Принята к публикации 08.09.2026